Untersuchungen

über die

Beziehungen der physikalischen Bodeneigenschaften zueinander und zur mechanischen Bodenanalyse.

Von der K. Technischen Hochschule zu München
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der technischen Wissenschaften
genehmigte Dissertation.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

Vorgelegt von
August Frankau.

Referent:
Prof. Dr. **Karl Kraus.**

Korreferent:
Geheimer Hofrat Prof. Dr. **Franz Ritter von Soxhlet.**

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Februar 1909.

Straubing 1909.
Cl. Attenkofer'sche Buch- und Kunstdruckerei.

Meinen Eltern in Dankbarkeit.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555418_0059

Es sei mir gestattet meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. **K. Kraus,** für die Anregung und Förderung der Arbeit, Herrn Assistent Dr. **K. Eberhart** für die freundlichst erteilten Weisungen innigst zu danken.

Einleitung.

Dass zwischen den physikalischen Bodeneigenschaften im Verhältnis zueinander, dann zu den Ergebnissen der mechanischen Bodenuntersuchungen Beziehungen bestehen, ist von vornherein klar, wenn man bedenkt, dass es zum Teil eine und dieselbe mechanische Beschaffenheit des Bodenmaterials ist, welche die Abstufungen in diesen Eigenschaften gleichsinnig beeinflusst. Grösse und Formverhältnisse der festen Bodenteile und die dadurch bedingte Art ihrer Zusammenlagerung bestimmen Form und Grösse des Bodenhohlraumvolumens und hiermit das Verhalten zum Wasser (Wasserfassung und Wasserbewegung) und zur Luft (Luftgehalt und Luftbewegung) und auch die Wärmeverhältnisse stehen wieder zu den gleichen Beschaffenheiten der Bodensubstanz in direkter und indirekter Beziehung.

Es wurde denn auch von verschiedenen Forschern nachgewiesen, dass solche Beziehungen tatsächlich bestehen, also aus der Feststellung des Masses der einen physikalischen Eigenschaft auf das einer anderen des gleichen Bodenmaterials, oder auf Grund der Kenntnis des mechanischen Aufbaus des einen Bodens und seiner wichtigsten physikalischen Eigenschaften auf jene eines anderen Bodens nächst übereinstimmender mechanischer Beschaffenheit geschlossen werden kann.

Über die Beziehungen zwischen den Grössenverhältnissen der festen Bodenteilchen und der Grösse des Bodenhohlraumvolumens stellte zuerst Soyka[1]) Unter-

[1]) Beobachtungen über die Porositätsverhältnisse im Boden Wollny, Forschungen auf dem Gebiete der Agrikultur-Physik. B. 8, S. 1

suchungen an. Lang[1]) bringt die mathematische Beweisführung, dass die Grössen der Hohlräume unabhängig von der Korngrösse sind. Mitscherlich[2]) stellt hiezu drei Hauptsätze auf:

1. Das Hohlraumvolumen ist unabhängig von der Grösse der Teilchen, vorausgesetzt, dass alle festen Teilchen gleiche Grösse haben.

2. Das Hohlraumvolumen wird bedingt durch die Lagerung der festen Teilchen, auch wenn die festen Teilchen alle einander gleich sind.

3. Bei verschiedener Grösse der Teilchen wird die Grösse des Hohlraumvolumens bedingt durch die Lagerung der Teilchen und durch die Art der Mischung der verschiedenartigen festen Teilchen, sowie durch ihre mehr oder weniger gleiche Grösse.

Den Nachweis, dass die Wasserkapazität eines Bodens um so grösser ist, je feiner die festen Bodenteilchen sind, erbrachte v. Liebenberg,[3]) welcher zu dem Ergebnisse kommt, dass die Wasserkapazität abhängig ist von der ungleichartigen Mischung verschiedener Korngrössen, von der verschiedenen Porosität und vor allem von der verschiedenen Feinheit der Bodenelemente; je feinerdiger ein Boden ist, um so grösser ist seine Wasserkapazität. Auch Wollny[4]) kommt zu dem Resultate, dass die Wasserkapazität mit der Feinheit des Kornes steigt. Die Befunde von Wollny,[5]) v. Klenze[6]) und Edler[7]) ergaben, dass das Wasser desto höher in einem Boden ansteigt, je feiner die feinsten Bodenteilchen sind.

---

[1]) Über Wärmekapazität der Bodenkonstituanten l. c. B. 1, S. 122.

[2]) Bodenkunde für Land- und Forstwirte. Berlin 1905. S. 84.

[3]) Über das Verhalten des Wassers im Boden. Forschungen etc. B. 1, S. 1.

[4]) Über die Wasserkapazität der Bodenarten l. c. B. 8, S. 189.

[5]) Untersuchungen über die kapillare Leitung des Wassers im Boden. l. c. B. 7, S. 269.

[6]) Untersuchungen über die kapillare Wasserleitung im Boden etc. Landwirtsch. Jahrbücher 1877. S. 125.

[7]) Die kapillare Leitung des Wassers etc. Göttingen 1882.

Haberlandt[1]) stellte aus Versuchsresultaten fest, dass die Wasserverdunstung einzelner Erdproben um so grösser sei, je grösser ihr Feuchtigkeitsgehalt ist. Wollny[2]) sagt, dass das Verdunstungsvermögen der Böden an sich von ihrer physikalischen Beschaffenheit abhängig ist: je geringer ihre Permeabilität für Wasser, je grösser ihre Wasserkapazität ist und je leichter sie den stattgehabten Feuchtigkeitsverlust auf kapillarem Wege zu ersetzen imstande sind, um so intensiver gestaltet sich die Verdunstung.

Die Untersuchungen von Seelheim[3]) zeigten, dass die Durchlässigkeit des Bodens für Wasser bei konstantem Druck und gleichbleibender Temperatur von der Länge der Erdsäule und ihrem Querschnitt abhängt. Geht Wasser durch verschieden dichte Schichten, so sei nur die Dicke der Schicht des feinsten Sandes massgebend.

Ausführliche Untersuchungen über die Wärme im Boden stellte Schumacher[4]) an. Er kam zu dem Resultate, dass die Wärmekapazität eines Bodens mit der Zunahme des spezifischen Gewichtes abnehme, dass ferner humusreiche Bodenarten eine hohe spezifische Wärme haben, Quarzsand hingegen eine geringe. Pfaundler[5]) fügt hinzu, dass ausser dem Gehalt an organischen Überresten auch ein grösserer Wassergehalt die Wärmekapazität erhöhe.

Der erste, der den Einfluss der Farbe auf die Erwärmung des Bodens experimentell festzustellen suchte, war Schübler,[6]) dessen Versuche ergaben, dass die Farbe für die Erwärmung des Bodens vorzugsweise massgebend

[1]) Mitteilungen aus dem landw. Laboratorium der k. k. Hochschule für Bodenkultur. Wien 1877. S. 25—27.

[2]) Untersuchungen über die Verdunstung. Forschungen etc. B. 18, S. 515.

[3]) Durchlässigkeit des Bodens für Wasser. Besprochen l. c. B. 3, S. 242.

[4]) Die Physik des Bodens. Berlin 1864. S. 244 u. f.

[5]) Lang, Über die Wärmekapazität der Bodenkonstituanten. Forschungen etc. B. 1, S. 116.

[6]) Grundsätze der Agrikulturchemie II. T. 1838. S. 93.

sei. Wollny[1]) kommt nach eingehender Untersuchung zum Schlusse:

„Die Farbe der Oberfläche hat auf die Erwärmung der Böden im trockenen Zustande einen wesentlichen Einfluss, wo das Verhalten der mineralischen Bestandteile ein annähernd gleiches und die Menge der organischen Substanzen (Humus) so gering ist, dass zwar die Farbe dadurch dunkler wird, aber die spezifische Wärme und die Wärmeleitung keine bedeutende Abänderung erfahren. Wird diese Grenze im Humusgehalt überschritten, oder treten in ihren sonstigen physikalischen Eigenschaften grössere Unterschiede auf, so kann der Einfluss der Farbe vermindert, auch wohl vollständig beseitigt werden. In solchen Fällen kann der konkrete Versuch allein Aufschluss über die Bodenwärme geben."

Über das Verhältnis der Wasserkapazität zur Durchlüftbarkeit berichtet Heinrich,[2]) dass durch Wasser der Boden von der Luft abgeschlossen und das Eindringen der letzteren gehindert werde.

Beziehungen zwischen der Grösse der Bodenoberfläche (bestimmt mit Hilfe der Benetzungswärme) und dem Hohlraumvolumen (bestimmt mit Hilfe der Wasserkapazität) fand Mitscherlich[3]); er sagt, dass das Bodenhohlraumvolumen abhängig ist von der Form und Grösse der Bodenoberfläche, dass aber ferner die Form der Bodenoberfläche auch zu der Grösse dieser Oberfläche in Beziehung steht.

Alle diese Untersuchungen geben uns eine sehr wertvolle Einsicht in die fraglichen Beziehungen, aber doch nur im allgemeinen und der Grundlage nach. Will man aber von diesen Ermittlungen in bestimmten Fällen, bei

---

[1]) Einfluss der Farbe des Bodens auf dessen Erwärmung. Forschungen etc. B. 1, S. 69.

[2]) Über Prüfung der Bodenarten auf Wasserkapazität und Durchlüftbarbeit. Forschungen etc. B. 9, S. 259.

[3]) Untersuchungen über die physikalischen Bodeneigenschaften. Landw. Jahrbücher. 1901. S. 422.

bestimmten Bodenarten, Anwendung machen, und zwar in der Weise, dass das Verhältnis der physikalischen Eigenschaften nicht nur ungefähr, sondern ausreichend genähert zu bemessen ist, so findet man, dass die allgemeinen Anhaltspunkte unzulänglich sind.

Es sind noch nie alle die wichtigen physikalischen Eigenschaften an einem und demselben Bodenmaterial von bestimmter mechanischer Zusammensetzung untersucht worden, so dass man keinen tatsächlichen Ausweis darüber hat, wie weit bei gleicher mechanischer Zusammensetzung die Beziehungen der einzelnen physikalischen Eigenschaften zueinander gehen, ferner sind die meisten der oben angezogenen Untersuchungen an künstlich gemischtem Material und nicht an natürlichen Böden angestellt. Diese sind aber meistens recht komplizierte, künstlich nicht nachahmbare Mischungen, vielfach auch mit Bestandteilen, welche die künstlichen Mischungen nicht enthielten, so dass mit der Möglichkeit gerechnet werden muss, dass in natürlichen Böden physikalische Wirkungen sich geltend machen, die von jenen in künstlichen Gemischen abweichen.

Und um die Beziehungen der physikalischen Eigenschaften zur mechanischen Analyse überblicken zu können, genügt es nicht, mit gröberen Trennungen der Bodenteilchen zu arbeiten, vielmehr müssen die mechanischen Trennungen soweit irgend möglich bis ins feinste getrieben werden. Mit Material, dessen mechanische Zusammensetzung diesen Anforderungen entsprechend bekannt gewesen wäre, wurden physikalische Bestimmungen noch nicht ausgeführt.

In der vorliegenden Arbeit wurden neun Böden (Quarzsand, Kalksand, humoser Sand, lehmiger Sand, zwei Mergel, zwei Lehme, Ton), welche entweder selbst in der Hauptsache Hauptbodengemengteile darstellen, oder natürliche Mischungen derselben von ausgeprägt verschiedenem Charakter sind, nach den Methoden von Kühn und Schöne geschlämmt und auf Wasserkapazität, Wasserdurchlässigkeit, Kohäreszenz, Trennungswider-

stand, Hygroskopizität und Benetzungswärme untersucht; hiezu kamen einzelne chemische Bestimmungen.

Die Resultate gaben für die untersuchten Böden Aufschluss, einerseits über das Verhältnis im Masse der physikalischen Eigenschaften, andrerseits dieser zur mechanischen Analyse.

Ein Ausbau der Kenntnisse der Beziehungen in der angegebenen Richtung ist jedenfalls notwendig, wenn die mechanische Bodenanalyse zur Beurteilung des Bodenmaterials in höherem Masse anwendbar sein soll, als nach dem gegenwärtigen Zustande möglich ist. Die genaue Festlegung der Beziehungen der physikalischen Eigenschaften zueinander darf schliesslich auch beanspruchen, dass es bei Serienuntersuchungen eine grosse Vereinfachung bedeutet, wenn von dem Masse der einen physikalischen Eigenschaft zuverlässig auf das einer anderen geschlossen werden kann, so dass also die Bestimmung dieser anderen erübrigt.

I. Das Untersuchungsmaterial.

1. Quarzsand.

Dieser wurde der mittleren der drei Sandgruben in Massenhausen bei München entnommen. Die Grube befindet sich am Ostrande einer sich von Norden nach Süden hinziehenden Hügelkette, welche dem Tertiär, und zwar dem Obermiocän angehört. Nach v. Ammon[1]) ist im allgemeinen an dieser Stelle ein bunter Wechsel in der petrographischen Beschaffenheit der Tertiärschicht vorhanden. Der Sand durchzieht die Grube in einer 1.5 bis 2 Meter breiten Ader in einer Höhe von ungefähr 2 Meter über dem Horizont. Er findet zur Zeit als Bausand Verwendung.

Im natürlichen Zustande zusammenhanglos, ohne Geruch, fühlt er sich rauh an. Im lufttrockenen Zustande stellt er ein hellgraues Pulver dar, das beim Benetzen etwas dunkler wird. Bei einem Wassergehalt von

[1]) v. Ammon. Die Gegend von München. 1874. S. 76.

35 Gew. % lässt er sich am besten formen. Die Teile von der Korngrösse · 2.0 mm Durchmesser, · 7.0 mm Geschwindigkeit (bestimmt nach der Schöne'schen Methode) betragen 90 % des Gesamtbodens. Die petrographische Untersuchung der Teile dieser Korngrösse ergab reichlich 90 % Quarz, der Rest war Kaliglimmer, Pyrit, Magnesiaglimmer und sehr wenig Feldspat. Ein mit 10%iger kalter Salzsäure gewonnener Bodenauszug zeigte eine hellgelbliche Färbung. Der im Platintiegel geglühte trockene Sand ergab einen Glühverlust[1]) von 0.70 % (zum Teil verursacht durch einen Kalkgehalt von 4 %).

2. Kalksand.

Von einer Sandbank der Isar nächst der Bogenhauser Brücke bei München. Das Bett des Isartals besteht zumeist aus Alluvialkies, während die Ufer Gebilde des Tertiär sind. Zur Zeit des normalen Wasserstandes und der Hochflut wird der Kalksand angeschwemmt.

Im natürlichen Zustande ist dieser Sand rauh und zusammenhanglos, ohne besonderen Geruch, von grau-

[1]) Unter Glühverlust versteht man bekanntlich die Summe aller durch das Glühen flüchtig gegangener Substanzen (organische Substanz und Humus, Kristallwasser, chemisch gebundenes Wasser, dieses ganz oder zum Teil, ferner die Kohlensäure aus kohlensaurem Kalk).

Um den Glühverlust zu bestimmen, wurden 10 gr. lufttrockener Feinerde in einem Platintiegel 12 Stunden lang bei 100 ° C. in einem Trockenschrank getrocknet. Dann liess man im Exsiccator abkühlen; die nun vollkommen trockene Erde wurde gewogen. Hierauf wurde diese im Platingefäss über einem Gebläse geglüht, im Exsiccator abgekühlt und gewogen. Dieser Prozess wurde bis zur Gewichtskonstanz fortgesetzt. Die Differenzen zwischen dem Gewichte der Erde nach dem Trocknen und nach dem Glühen ergibt den Glühverlust. Schon Schübler (Agrikulturchemie II. S. 152) stellte fest, dass beim Ausglühen, vorzüglich der tonreichen Erdarten, der grösste Teil der sich in der Glühhitze verflüchtigenden Stoffe aus Wasser und nur ein geringer Teil aus Humus besteht. Tonreiche Bodenarten können selbst einen Glühverlust von 5—7 % ohne allen Humusgehalt zeigen. Durch den Glühverlust lässt sich Humus nur dann annähernd bestimmen, wenn der Boden keinen Ton, kohlensauren Kalk oder kein Eisenoxydhydrat enthält.

brauner Farbe. Bei einem Wassergehalt von 30 Gew. % nimmt er am leichtesten Form an, bei diesem Feuchtigkeitsgehalt ist er braun und hat trotz geringen Gehaltes an abschlämmbaren Teilen deutlichen sogenannten „Tongeruch“[1]). Mit Salzsäure übergossen, schäumt er seinem hohen Kalkgehalte[2]) von 98.9 % entsprechend sehr stark auf. Der zurückbleibende Rest an fester Substanz hat folgende Zusammensetzung:

ca. 90 % Quarz, unbestimmbare Verwitterungsprodukte und wenig organische Bestandteile. Die schwach gelbliche Färbung des Salzsäurefiltrats lässt auf einen schwachen Eisengehalt schliessen. Kugeln zur Kohär-

[1]) Schon Crome (Der Boden und sein Verhältnis zu den Gewächsen 1812, S. 30) sagt: „Der Ton besitzt einen ganz eigentümlichen Geruch, welchen man vorzüglich bemerkt, wenn man ihn, nachdem er vorher stark erwärmt war, befeuchtet. Es ist noch nicht ausgemacht, ob man diesen eigentümlichen Geruch einem seiner drei Bestandteile oder welcher Ursache man ihn zuschreiben soll.“ Ramann (Bodenkunde S. 82) schliesst sich der Ansicht Semiatschenski's an, dass der dem trockenen Ton beim Anhauchen eigentümliche Duft nur eine Folge der Reizung der Geruchsnerven durch sehr feinkörnige Körper sei. Nicht alle Tone haben diesen Geruch. (S. S. 15.) Vergl. auch Senft, die Tonsubstanzen, S. 21.

[2]) Sämtliche Böden wurden mit dem Passon'schen Apparat auf ihren Kalkgehalt untersucht. Ausserdem fand bei jenen Böden, welche den kohlensauren Kalk in einem höheren Prozentsatz enthalten (Kalksand und die Mergelböden), die Methode von Immendorf Anwendung. Nach dieser Methode wird in 50 gr der lufttrockenen Feinerde der kohlensaure Kalk mit verdünnter Salpetersäure abgesättigt, hierauf mit Salpetersäure $^1/_2$ Stunde gekocht. Dann lässt man absitzen, dekantiert in eine $^1/_2$ l-Karaffe, schlämmt wiederholt mit Wasser auf und dekantiert jedesmal, bis 500 cm³ erreicht sind, dann schüttelt man durch und filtriert in eine trockene Flasche. 50 cm³ (= 5 gr Boden) der Lösung werden mit Ammoniak übersättigt, der entstandene Niederschlag wird durch tropfenweisen Zusatz von Salzsäure von 1.1 spez. Gewicht bis zur schwachsauren Reaktion gelöst, sodann wird erwärmt und mit oxalsaurem Ammon ausgefüllt. Der Niederschlag wird nach einigen Stunden, wenn er kristalinisch geworden ist, abfiltriert, mit heissem Wasser ausgewaschen, zuerst auf dem Bunsenbrenner und dann zehn Minuten lang auf einem Gebläse geglüht und der Ätzkalk gewogen.

eszenzbestimmung des gefrorenen Bodens liessen sich wie beim Quarzsand nicht formen.

Die Teilchen der Korngrösse < 2.0 mm D., > 7.0 mm G. bilden 53.45 % des Gesamtbodens. Der Glühverlust betrug 42.09 %; dieser erklärt sich aus dem hohen Kalkgehalt.

3. Humoser Sand.

Ebenfalls aus der mittleren der Massenhausener Gruben. Er bildet eine schwache, auf Ton, Mergel usw. aufgelagerte, unter 20° nach Norden geneigte Schicht im nördlichen Teile der Grube. Die natürliche Lagerung weist darauf hin, dass durch Wasserbewegung sich Quarzsand und Humusteile beim Herabwaschen durch Regen vermischt haben.

Im lufttrockenen Zustande bildet dieser humose Sand ein zusammenhangloses, rauhes, geruchloses, schwarzgraues Pulver, das beim Anfeuchten dunkler und glänzend wird und nach verfaultem Holze riecht. Die Teile der Korngrösse < 2.0 mm D., > 7.0 mm G. betragen 52.60 % des Gesamtbodens. Mit 10%iger kalter Salzsäure übergossen, braust dieser Sand deutlich auf. Der Kalkgehalt beträgt 4.25 %. Das Salzsäure-Filtrat zeigt bräunlichgelbe Färbung. Auf dem Filter bleiben ca. 10 % organische Substanz und 80 % Quarzsand, dann Feldspäte und Glimmer zurück. Bei einem Wassergehalt von 40 Gew. % lässt sich dieser Sand am bequemsten in Formen bringen. Die mit grösster Sorgfalt gefertigten Kugeln, etwa von Billardkugelgrösse, zeigten beim Gefrieren eisblumenartige Zeichnungen an der Oberfläche. Solche gefrorene Kugeln sprangen bei der Kohäreszenzbestimmung nicht, es drang auch kein Wasser aus der Oberfläche, sondern sie platteten sich an der Druckstelle zuerst ab und zerfielen dann in Krümel Beim langsamen Auftauen bei + 2° C. setzte sich der Boden stark. Im Innern des langsam aufgetauten durchschnittenen Materials zeigten sich keine Hohlräume, ein Zeichen, dass in dem angefeuchteten Boden keine Luftblasen vorhanden waren; ferner war der

Boden deutlich in Krümelstruktur übergegangen. Wird die aufgetaute Kugel getrocknet, so bleibt die Oberfläche glatt und ohne Risse, der Bruch zeigt Krümelung und einzelne Löcher. Der Glühverlust betrug 6.6 %.

4. Lehmiger Sandboden.

Vom Versuchsfelde der landwirtschaftlichen Abteilung der Münchener Kgl. Technischen Hochschule in Obermenzing. Er ist diluvial, nach v. Ammon „Decklehm". Erscheint in 30—40 cm hoher Schicht über diluvialem Gerölle. Im natürlichen und trockenen Zustande mässig fest, lässt er sich leicht zerreiben und zerdrücken, wobei er ein sandiges braunes Pulver gibt, das angefeuchtet dunkler wird, moderig riecht und sich leicht zu Kugeln ballen lässt. Zu 45 Gew. % Wasser enthaltend, lässt er sich am leichtesten formen.

Die Teilchen < 0.2 mm bilden 35.25 % des Gesamtbodens, jene des hydraulischen Wertes < 2.0 mm D., > 7.0 mm G. enthalten 75 % Quarz, dann Mineralien der Amphibol- und Pyroxengruppe mit Eisenauswitterung, endlich stark verwitterte Feldspäte. Kalkgehalt 0.2 %. Der Salzsäureauszug erscheint dunkelgelb. Die gefrorenen Kugeln verändern während des Gefrierens ihr Äusseres nicht. Bei der Kohäreszenzbestimmung sprangen die gefrorenen Kugeln in 3—4 Stücke, auch trat Wasser an die Oberfläche.[1]) Beim Auftauen trat ebenfalls viel Wasser aus und die aufgetaute Erde zeigte starke Krümelbildung. Wurden die aufgetauten Kugeln getrocknet, so war ihre Oberfläche reichlich gekrümelt und die Kugeln platteten sich beim Auftauen, ohne zu zerfallen, an der

[1]) v. Gümbel sagt über diese Erscheinung (Geologie von Bayern I. T. S. 338): Das Eis, an sich spröde, erweicht jedoch teilweise unter grösserem Drucke, weil es die merkwürdige Eigenschaft hat, dass durch Druck sein Gefrierpunkt erniedrigt wird. Beim Nachlassen des Druckes oder weiterer Erniedrigung der Temperatur nimmt es wieder feste Formen an. (Regelation.) Vergleiche auch v. Lommel, Experimental-Physik. Leipzig 1908. S. 180.

Aufliegestelle stark ab. Der Bruch war innen krümelig und ohne Löcher.

Der Glühverlust betrug 5.6 %.

5. Mergel.

Er durchzieht den Nordrand der mittleren der drei Gruben bei Massenhausen (siehe oben) in einer nach Norden unter 40° geneigten Ader. Aus den Schichtungsverhältnissen kann geschlossen werden, dass dieser Mergel durch Einlagerung von kohlensaurem Kalk in mit Lehmsubstanz durchmischten Quarzsand entstanden ist. Im natürlichen getrockneten Zustande geruchlos, krümelig mit vielen Sprüngen und Rissen, leicht zwischen den Fingern zu einem feinen, staubartigen, seifigen Pulver zerreiblich.

Er nimmt Wasser sehr langsam auf; bei ungefähr 45 Gew. % Wassergehalt lässt er sich gut zu Kugeln formen. Er klebt an der Zunge und riecht nach Ton.

Die Teile des hydraulischen Wertes > 0.2 mm, < 2.0 mm G. bilden 43 % des Gesamtbodens, jene des hydraulischen Wertes < 2.0 mm D., < 7.0 mm G. brausen mit Salzsäure übergossen stark auf, — der Kalkgehalt des Gesamtbodens beträgt 29.5 % — damit gesättigt bleibt zirka ⅔ der Substanz zurück. Der Rückstand enthält 90 % Quarz, der Rest besteht aus Feldspäten und unbestimmbaren Verwitterungsprodukten. Das Salzsäurefiltrat war hellgelb. An der Oberfläche gefrorener Kugeln bilden sich eisblumenartige Zeichnungen. Beim Auftauen entstehen dort viele Krümel, die Kugeln springen nicht auseinander, auch tritt kein Wasser aus. Trocknet dann die aufgetaute Kugel aus, so bilden diese Krümel Schuppen, dazu kommen feine, aber tiefe Risse an der Oberfläche, die Kugelform bleibt bestehen. Der Bruch zeigt auch im Innern viele, aber sehr dicht gelagerte Krümel. Zwischenräume von einiger Grösse sind nicht vorhanden. Der Glühverlust war, dem hohen Kalkgehalte entsprechend, 11.43 %.

6. Mergel.

Von einem Feld am Nordrande von Erling, südlich vom Kloster Andechs.

Vom Ostufer des Ammersees zieht sich ein Tertiärhügel, an der Oberfläche strichweise mit Kalktuff überzogen, nach Herrsching und von da südwärts bis Kloster Andechs hinauf.

Im natürlichen getrockneten Zustande sind Brocken dieses Mergels festzusammenhängend, weissgrau; sie haben wenige, aber grosse Risse. Er ist geruchlos und lässt sich zwischen den Fingern zu feinem Pulver zerreiben. Zerdrückt gibt er kleine, stark poröse Krümel. Angefeuchtet wird er bräunlich, hat bei zirka 50 Gew. % Wassergehalt die grösste Formbarkeit, einen schwachen Tongeruch, auch klebt er an der Zunge. Mit Salzsäure übergossen braust er, dem Kalkgehalte von 69.32 % entsprechend, stark auf, zirka $^1/_3$ der Substanz bleibt zurück. Der Rückstand enthält 90 % Quarz und feldspatähnliche Verwitterungsprodukte. Die Teilchen der Korngrösse > 0.2 mm G., < 2.0 mm G. machen 43 % des Gesamtbodens aus.

Das Salzsäurefiltrat ist hell; auf dem Filter bleiben stellenweise feinste Teilchen, wahrscheinlich aufgeschlämmte feinste Ton- und Mineralteilchen, in Form dünner Häutchen zurück.

Beim Gefrieren der Kugeln tritt ausser einer Volumsvergrösserung keine äusserlich sichtbare Veränderung ein. Bei der Bestimmung der Kohäreszenz dieser gefrorenen Kugeln tritt infolge des Druckes viel Wasser an die Oberfläche. Beim Auftauen zeigen sich aussen viele Krümel und eine starke Wasserausscheidung; der Bruch weist innen viele Hohlräume auf. Der Glühverlust betrug 25.34 %.

7. Lehm.

Von Freising, aus einem Felde südlich der Lang'schen Ziegelei beim Schönleutnerhof; am Nordrande eines von der Strasse nach Vötting nach Nordosten ziehenden Tertiärhügels.

Im natürlichen und trockenen Zustande haben Brocken dieses Lehms eine ziemlich glatte Oberfläche mit vielen kleinen Rissen. Er lässt sich zwischen den Fingern zu einem staubartigen Pulver zerreiben und zerdrücken; Farbe rotbraun. Angefeuchtet hat er bei einem Wassergehalt von 50—60 Gew. % die grösste Formbarkeit und einen schwachen Tongeruch, trocken ist er geruchlos.

Mit Salzsäure übergossen braust er nicht auf, das Filtrat ist gelb.

Die Teilchen < 0.2 mm G. bilden 37.40 %[1]) des Gesamtbodens. Die Teile des hydraulischen Wertes < 2.0 mm D., > 7.0 mm G. enthalten 80 % Quarz, Rest Feldspäte und wenig Augite. — Der Gehalt an kohlensaurem Kalk beträgt 0 %.

Gefrorene Kugeln zeigen an der Oberfläche eisblumenartige Zeichnungen. Beim Zerdrücken der gefrorenen Kugeln tritt kein Wasser an die Oberfläche, ebenso nicht beim Auftauen. In beiden Fällen bilden sich aber grosse Krümel und viele kleine Hohlräume im Innern. Beim langsamen Austrocknen der aufgetauten Kugeln treten der eisblumenartigen Zeichnung entsprechende feine Risse an der Oberfläche auf. Der Bruch dieser Kugeln zeigt viele kleine Löcher.

Der Glühverlust betrug 4.30 %.

8. Lehm.

Sogenannter Decklehm (nach v. Ammon) aus Oberföhring bei München, wo er an mehreren Stellen zutage tritt und in der Ziegelfabrikation Verwendung findet. An der Entnahmestelle war eine deutliche Schichtung zu beobachten. Jedoch hat die an Ort und Stelle vorgenommene Untersuchung keine besonderen Unterschiede nach

[1]) Dieser Wert erscheint etwas zu niedrig, was sich dadurch erklärt, dass der Boden im Apparat von Schöne immer wieder krümelte. Derselbe Boden ergab im Apparat von Kopecky, in welchem Krümelbildung mehr hintangehalten wird, für den hydr. Wert < 0.2 mm G 46.19 %. Beim Lehm aus Oberföhring war die Differenz für ob. hydr. Wert nach beiden Methoden untersucht nur 0.6 %.

Schichten ergeben. Zirka 3 Meter unterhalb dieses Lehms befindet sich Gerölle des Hochterrassenschotters. v. Gümbel[1]) schreibt darüber: „Als ein für die durch den gänzlichen Mangel aller echten Moränenbildung charakterisierte Geröllebene ebenso bezeichnendes, wie technisch wichtiges Glied diluvialen Alters ist ein braunroter, lössartiger[2]) Lehm, welcher im Osten von München die Höhen von Berg am Laim bis Föhring in einer Mächtigkeit von ungefähr 3 Meter überdeckt und ein vortreffliches Rohmaterial zur Herstellung von Ziegelsteinen liefert, anzuführen."

In der Natur ist dieser Lehm wenig fest, er lässt sich leicht zerreiben und zerdrücken, wobei er ein sehr feinkörniges Pulver gibt, welches geruchlos ist.

Angefeuchtet lässt er sich bei 50—60 Gew. % Wassergehalt am besten formen und riecht nach humoser Substanz. Das Salzsäurefiltrat ist hellgelb.

Die Teile < 0.2 mm G. machen 42.20 % des Gesamtbodens aus. Die Teilchen des hydraulischen Wertes < 2.0 mm D., > 7.0 mm G. enthalten circa 40 % Feldspäte und 40 % Quarz, dann Augite und stark verwitterte Mineralien, welche wahrscheinlich auch von der Pyroxen- und Amphibolgruppe herstammen. Der Kalkgehalt beträgt 0.082 %.[3])

Lässt man diesen Lehm zu Kugeln geformt frieren, dann treten an der Oberfläche eisblumenartige Zeichnungen auf. Beim Auftauen tritt, wegen der grossen Wasserkapazität, kein Wasser an die Oberfläche, auch zeigen sich keine Sprünge. Im Innern einer solchen auf-

[1]) v. Gümbel, Geologie von Bayern II. B. S. 364. Kassel 1894.

[2]) Unter Löss versteht Gümbel einen lichtbraunen, erdig lockeren, lehmähnlichen Ton, meist ohne deutliche Schichtung, welcher durch einen beträchtlichen Gehalt an Kalk (10—30 %) neben quarzig-sandigen Beimengungen und dadurch sich auszeichnet, dass er da, wo er in tiefen Einschnitten durchfurcht wird oder in hohen Wänden entblösst ist, sich auf eine sehr charakteristische Weise in vertikal sich ablösenden Schollen abblättert. (Grundzüge der Geologie, S. 178.)

[3]) Chemische Analysen dieses Lehms wurden von Schwager in „Geognostische Jahreshefte 1899, 12. Jahrgang" angegeben.

getauten Kugel finden sich viele Hohlräume, der Bruch ist krümelig. Lässt man die aufgetauten Kugeln austrocknen, dann entstehen entsprechend den eisblumenartigen Zeichnungen an der Oberfläche feine, tiefe, verästelte Risse, auch bilden sich viele Krümel und der Bruch zeigt im Innern der Kugel viele kleine Löcher.

Der Glühverlust betrug im Gegensatz zum vorhergehenden Lehm nur 1.50 %.

9. Ton.

Aus einer tertiären Tonablagerung bei Regenstauf.

v. Gümbel[1]) sagt darüber: „Eine von tertiären und diluvialen Absätzen eingeebnete Vertiefung zieht von Walhallastrasse nach Regenstauf bis Ponholz. In einzelnen Gruben gewinnt man hier weisse Tonerde. Diese Tonablagerungen bilden einen, wenn auch vielfach unterbrochenen Zug am Westrande des Urgebirges, welches schon im Süden bei Regenstauf beginnt."

Im natürlichen und trockenen Zustande sehr hart, lässt er sich zwischen den Fingern nicht zerreiben und schwer zerdrücken. Die Brocken haben glatte Oberflächen und fühlen sich seifig an.

Angefeuchtet besitzt er bei zirka 80 Gew. % Wassergehalt die grösste Formbarkeit, klebt an der Zunge und lässt sich leicht zu Kugeln mit schlüpfriger Oberfläche ballen. Der sogenannte Tongeruch ist nicht bemerkbar.

Die Teilchen des hydraulischen Wertes < 2.0 mm D., > 7 mm G. bestehen aus 80 % Feldspäten und Mineralien, welche dem Kaolin näher als dem Feldspat stehen, jedoch aus letzterem entstanden; der Rest ist Quarz. 0 % Kalk.

Das Filtrat der mit Salzsäure gesättigten Feinerde erscheint schwach gelb.

Der Glühverlust war 11,4 % und rührt zum grössten Teil von chemisch gebundenem Wasser her.

Die gefrorenen Kugeln behalten ihre glatte Oberfläche unverändert bei. Unter Druck tritt Wasser an die Oberfläche. Der Bruch zeigt innen viele Krümel. Das

[1]) l. c. S. 497. u. 500.

Äussere der aufgetauten und getrockneten Kugeln ist sehr krümelig, ebenso das Innere der durchschnittenen Kugeln.

II. Die Untersuchungsmethoden.

1. Die mechanische Analyse.

Hier kamen zwei Methoden in Anwendung, die von Kühn und von Schöne.

Die Kühn'sche Methode wurde deshalb benützt, weil sie sowohl in der Literatur vorherrscht, als auch in den meisten Versuchsstationen Verwendung findet. Sie ist einfach und führt ziemlich rasch zum Ziele. Bei Untersuchungen, wo die Trennung in abschlämmbare und nicht abschlämmbare Teile genügt, ist sie am Platze. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde folgendermassen verfahren:

Eine Mittelprobe von 50 gr des durch ein 2 mm Sieb durchgesiebten Bodens (Feinerde) wurde in einer Porzellanschale so lange gekocht, bis alle Bodenteilchen sich voneinander getrennt hatten, d. h. in Einzelkornstruktur übergegangen waren, hierauf wurde sie in den Kühn'schen Schlämmcylinder (30 cm hoch, 12.5 cm weit, mit Marke bei 28 cm) gebracht. Alsdann wurde mit Wasser bis zur Marke aufgefüllt, mit einem Glasstabe umgerührt und 10 Minuten ruhig stehen gelassen. Hierauf wurde das Wasser entgegen der Vorschrift[1]) nicht durch die Öffnung in der Nähe des Bodens des Cylinders abgelassen, sondern, um starke Strömungen zu vermeiden, bis 5 cm über dem Gefässboden abgehebert. Dieses Auffüllen und Abhebern wird so lange fortgesetzt, bis das Wasser am Boden des Gefässes klar geworden war, was je nach der Bodenart 2 bis 6 Stunden dauerte.

Der Rückstand im Cylinder wurde in einer Porzellanschale getrocknet; die erkaltete Sandmenge gewogen und dann durch ein 1 mm, 0.5 mm Rundsieb nach Alexander Müller und ein 0.25 mm Messingdrahtsieb Nr. 100 von

[1]) Steinriede, Anleitung zur mineralogischen Bodenanalyse Leipzig 1889, S. 12.

Amandus Kahl aus dem Siebsatze des Verbandes landw. Versuchsstationen gesiebt und jede Korngrösse gewogen. Die Menge der abschlämmbaren Teile ergibt sich, wenn man das Gewicht des Cylinderrückstandes von 50 gr abzieht.

Nach der Schöne'schen Methode[1]) wird in fünf Grössen, resp. hydraulische Werte sortiert. Die Wirkungsweise des Schöne'schen Schlämmapparates ist nach Untersuchungen von Fesca[2]) eine sehr regelmässige. Denn wenn auch der Boden hiebei an und für sich nicht spezifiziert wird, so wird doch für den Vergleich verschiedener Bodenarten miteinander eine Grundlage geschaffen. Auch Kopecky[3]) weist auf die Richtigkeit und Verwendbarkeit dieser Methode hin.

Sie ist jedoch langwieriger wie jene nach Kühn und verlangt einen geübten Analytiker, doch zerlegt sie den Boden in mehrere Sortimente und arbeitet genau und teilweise selbständig. Vor Beginn der Arbeit ist es nötig, den Apparat genau zu eichen, d. h. zu ermitteln, in welcher Beziehung die Wassergeschwindigkeit in den Cylindern zur Höhe der Wassersäule im Piëzometer steht.

Verfasser ging bei seinen Untersuchungen folgendermassen vor:

20 gr der lufttrockenen Feinerde wurden so lange mit destilliertem Wasser gekocht, bis die Bodenteilchen in Einzelkornstruktur übergegangen waren. Darauf wird sie mit Wasser in den Orth'schen Cylinder des Schöneschen Apparates gespült, in welchem zuerst zirka 3 cm hoch Wasser eingelassen wurde, um Stauungen zu vermeiden. Die Teilchen von verschiedenen hydraulischen Werten wurden durch verschiedene Geschwindigkeiten des durchfliessenden Wassers getrennt und gewonnen, in-

[1]) Vergleiche Schöne, Über Schlämmanalyse und einen neuen Schlämmapparat 1867, S. 61 und Mayer, Eine Modifikation des Schöne'schen Schlämmapparates. Forschungen etc. B. 5, S. 228.

[2]) Agronomische Bodenuntersuchungen etc. Journal für Landwirtschaft 1879.

[3]) Die Bodenuntersuchung zum Zwecke der Drainagearbeiten. 1901. S. 31.

dem das abfliessende Wasser mit den Teilchen von dem entsprechenden hydraulischen Werte in Filtrierstutzen aufgefangen wurde, bis es klar floss. Dann wurde sedimentieren gelassen, abgehebert und das übrig gebliebene Wasser, nachdem es mit den Bodenteilchen in Porzellanschalen gespült worden war, abgedampft und der Boden getrocknet.

Ton und Lehm mussten öfters aus dem Apparat herausgespült und erneut gekocht werden, weil sie, besonders bei den geringen Geschwindigkeiten, wegen ihrer grossen Adhäsion Flocken bildeten.

Der Feinboden wurde nach folgenden hydraulischen Werten getrennt:

< 0.2 mm	Geschwindigkeit.		
> 0.2 mm	„	< 1.0 mm	G.[1])
> 1.0 mm	„	< 2.0 mm	„
> 2.0 mm	„	< 7.0 mm	„
< 2.0 mm	Durchmesser	> 7.0 mm	„

Die Teilchen des letzten hydraulischen Wertes wurden zur petrographischen Bestimmung der Böden verwendet.

2. Die Bestimmung der Wasserkapazität.

Von den gebräuchlichen Methoden wurde die von Wolff[2]) und von Wahnschaffe[3]) angewendet, von denen besonders die erste gute Resultate gibt. Die Methode von Wahnschaffe fand besonders deshalb Verwendung, weil das Ergebnis der Bestimmungen nach Wolff bei einzelnen Böden mit der allgemeinen Beurteilung nicht übereinzustimmen schien; sie ergab jedoch gleichsinnige Resultate mit der Wolffschen Methode.

Die Bestimmung der Wasserkapazität nach Wolff wurde wie folgt vorgenommen: In einen Blechcylinder

[1]) Um die im Boden in grösserer Menge vorhandenen Sande ihrer Menge nach genau zu charakterisieren.

[2]) Wahnschaffe, wissenschaftliche Bodenuntersuchung, Berlin 1903, S. 161 u. f.

[3]) l. c. S. 160—161.

(15 cm hoch, 4 cm weit), dessen Inhalt genau bekannt ist und der zirka 3 cm vom unteren Rande durch ein enges Drahtsieb abgeschlossen ist, über welches man noch ein Stück angefeuchtete Gaze gibt, wird Feinerde unter zeitweisem Aufstossen bis 1 cm vom oberen Rande eingefüllt. Das Volumgewicht der Erde wird festgestellt.

Die zu einem Versuche verwendeten 4 Cylinder stellte man in eine Glaswanne, welche 5 cm hoch mit destilliertem Wasser gefüllt war. Das Ganze schloss eine Glasglocke fast luftdicht ab. Diese Cylinder bleiben so lange stehen, bis sie konstantes Gewicht besitzen. Die Gesamtgewichtszunahme entspricht der Menge des aufgenommenen Wassers. Daraus kann die Wasserkapazität nach Gewichts- und Volumprozenten berechnet werden. Die Versuche wurden mit Feinerde in Einzelkorn- und in Krümelstruktur durchgeführt.

Die Methode von Wahnschaffe wurde genau nach Vorschrift angewendet.

3. Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit.

Zur Verwendung gelangte ein Apparat, der dem System Welitschkowsky[1]) nachgebildet war. Dieser Apparat gestattet, über dem Untersuchungsmaterial eine Wasserschicht von konstanter Höhe zu erhalten.

Ein 10 cm langer Messingcylinder von 5 cm Durchmesser mit einem Drahtnetz als Boden wird unter fortwährendem Aufstossen mit Feinerde gefüllt. Das Volumgewicht soll dann dem bei der Wasserkapazitätsbestimmung gewonnenen gleich sein.

Der Cylinder wird mit seinem oberen Teil an eine Röhre wasserdicht angeschraubt. Diese Röhre, deren Boden ebenfalls aus einem feinen Drahtnetz besteht, trägt an der einen Seite in Abständen von 10 zu 10 cm Tuben von 1.5 cm Durchmesser, auf der entgegengesetzten Seite ein Wasserstandrohr, an welchem unten ein Hahn angebracht ist.

---

[1]) Vergleichne Wollny, Untersuchungen über die Permeabilität des Bodens für Wasser. Forschungen etc. B. 14, S. 11.

Bei Ausführung des Versuchs wurden alle Tuben mit Ausnahme der von 100 cm Höhe verschlossen und zuerst durch das Wasserstandrohr, später durch die Röhre langsam Wasser eingefüllt, so dass ein konstanter Druck einer 100 cm hohen Wassersäule erzielt wurde.

Die während 10 Stunden durch die Erde abtropfende Wassermenge wurde gemessen.

4. Die Bestimmung der Kohäreszenz.

Es gelangte die Untersuchungsmethode von Puchner[1]) mit dem von diesem beschriebenen Apparate von Braun zur Anwendung.

Die Vorbereitung des Bodens zur Untersuchung geschah nach den Angaben von Hazard[2]), indem 30 gr Feinerde mit Wasser durchgeknetet, hierauf zu einer Kugel geformt und an der Luft getrocknet wurde. Dies geschah deshalb, weil Kalk- und Quarzsand keine haltbaren Cylinder gaben, sich jedoch zu Kugeln formen liessen, und eine gleichmässige Vorbereitung aller zu untersuchenden Böden als zweckmässig erschien.

5. Die Bestimmung des Trennungswiderstandes.

Die Versuche wurden genau nach den Angaben von Puchner[3]) durchgeführt und die Böden bei 0 %, 50 % und 100 % der vollen Wasserkapazität untersucht.

6. Die Hygroskopizität und Benetzungswärme.

Die Hygroskopizität[4]) wird mit Hilfe der statischen Dampfspannungsmethode bestimmt, welche darauf beruht, dass man Bodenproben im Vakuumexsiccator über 10 %iger Schwefelsäure aufstellt und die Dampf-

[1]) Untersuchungen über die Kohäreszenz der Bodenarten. Forschungen etc. B. 12, S. 226 u. f.

[2]) Die geologisch-agronomische Kartierung als Grundlage einer allgemeinen Bonitierung des Bodens. Landwirtsch. Jahrbücher 1900. S. 891—892.

[3]) l. c. S. 208.

[4]) Mitscherlich. Bodenkunde für Land- und Forstwirte. S. 16, 56 u. f. und Untersuchungen über die phys. Bodeneigenschaften. Habilitationsschrift, Kiel, (Merseburg) 1901. S. 20 u. f.

spannung des Bodens mit der Schwefelsäure sich ausgleichen lässt. Dieser Ausgleich fand bei meinen Versuchen bei Zimmertemperatur von ungefähr + 15° C. statt. Der Wassergehalt des Bodens nach dem Dampfspannungsausgleich wird in Gewichtsprozenten des trokkenen Bodens berechnet.

Die Benetzungswärme[1]) entspricht der Molekülarbeit, d. i. der Arbeit, welche geleistet wird, um die gegenseitige Anziehungskraft der Wasserteilchen untereinander durch die Anziehungskraft der festen Substanz auf die Wassermoleküle aufzuheben. Sie wird in einem für diesen Zweck konstruierten Eiskalorimeter gemessen.

III. Die Untersuchungsergebnisse.

1. Die mechanische Zusammensetzung.

Die Resultate der mech. Bodenanalyse geben gewiss schon Anhaltspunkte zur Beurteilung der Fruchtbarkeitsfaktoren eines Bodens. Es wäre jedoch falsch, ohne weiteres von diesen auf die Bodenfruchtbarkeit schliessen zu wollen, da auch sonstige, aus den Ergebnissen der mechan. Bodenanalyse nicht schlechthin oder überhaupt nicht ersichtliche Eigenschaften des Bodens, dazu seine Struktur berücksichtigt werden müssen. Tritt zur mech. Analyse der genaue petrographische und mineralogische Befund und die mikroskopische Analyse der feinsten Teilchen, so erweitert sich die Brauchbarkeit der mechanischen Analyse zur Beurteilung eines Bodens ganz wesentlich.

Die oben beschriebenen Böden ergaben, nach der Kühn'schen Methode untersucht, folgende Resultate.

[1]) Mitscherlich. Beurteilung der phys. Eigenschaften des Ackerbodens mit Hilfe seiner Benetzungswärme. Journal für Landwirtschaft. 1898. S. 255 u. f.

Benennung des Bodens	Abschlämmbare Teile in %	Nicht abschlämmbare Teile in %	Teile 1 mm %	< 0.5 mm %	> 0.25 mm %	< 0.25 mm %
Quarzsand	2.77	97.23	0.05 (0.04)	1.95 (1.94)	82.00 (79.58)	16.00 (15.60) [1]
Kalksand	6.23	93.77	0.01 (0.01)	0.08 (0.08)	25.65 (23.64)	74.26 (69.24)
humoser Sand	30.08	69.92	48.11 (32.04)	42.94 (28.18)	6.93 (4.70)	1.70 (1.16)
lehmiger Sandboden	52.70	47.30	3.43 (1.58)	25.80 (11.88)	20.53 (9.40)	50.24 (23.08)
Mergel von Massenhausen	52.30	47.70	1.45 (0.90)	13.37 (6.36)	18.01 (8.30)	67.17 (30.90)
Lehm von Freising	74.80	25.20	0.05 (0.10)	4.23 (1.10)	27.06 (6.50)	68.66 (17.44)
Lehm von Föhring	73.90	26.10	0.66 (0.16)	4.58 (1.14)	12.00 (3.10)	82.66 (21.44)
Mergel von Erling	81.90	18.10	0.03 (0.07)	0.16 (0.32)	0.71 (1.53)	8.00 (15.99)
Ton	96.10	3.90	Die Siebprodukte wurden nicht gewonnen, weil beim Trocknen des Bodens sogleich Krümelung eintrat.			

Obige Zahlen, sowie sämtliche folgenden, sind die Durchschnittsresultate von zwei oder mehreren Parallelversuchen. Die Böden wurden in das Thaer'sche System eingereiht und erhielten die in der Tabelle angegebene Reihenfolge. Ein Blick in die Rubrik „abschlämmbare Teile" ergibt, dass diese vom Quarz zum Ton zunehmen. Die Siebprodukte jedoch ergaben keine derartige Regelmässigkeit.

[1]) Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf den Gesamtboden.

Die Untersuchungsergebnisse nach der Methode von Schöne sind folgende:

Benennung des Bodens	< 0.2 mm G. %	> 0.2 mm G. < 1.0 mm G. %	> 1.0 mm G. < 2.0 mm G. %	> 2.0 mm G. < 7.0 mm G. %	< 2.0 mm D. > 7.0 mm G. %
Quarzsand	1.00	2.20	1.90	4.90	90.00
Kalksand	7.80	6.60	8.35	23.80	53.45
Humoser Sand	21.90	9.60	4.80	11.10	52.60
Lehmiger Sandboden	35.25	16.35	6.70	14.55	27.15
Mergel von Massenhausen	25.10	30.00	13.00	12.65	19.25
Lehm von Freising	37.40	33.45	11.00	8.65	9.50
Lehm von Föhring	42.20	35.57	10.30	6.20	5.73
Mergel von Erling	41.16	33.71	9.89	9.05	6.19
Ton	87.02	3.14	4.03	2.83	2.98

Die Summe der hydraulischen Werte < 0.2 mm + > 0.2 mm, < 1.0 mm zeigt ein regelmässiges Anwachsen von Quarzsand zum Ton, ebenso jeder der beiden Werte für sich:

Sande	Quarzsand	3.20
	Kalksand	14.40
	humoser Sand	31.50
Sand. Lehm u. Mergel [1])	lehm. Sandboden	51.60
	Mergel v. Massenhausen	55.10
Lehm und Mergel	Lehm v. Freising	70.85
	Lehm v. Föhring	77.77
	Mergel a. Erling	74.87
Ton	Ton	90.16

Bei den Grössen der anderen hydraulischen Werte findet sich keine Regelmässigkeit in obigem Sinne.

[1]) Der Mergel von Massenhausen wurde wegen seines geringen Gehaltes an feinsten Teilen und seines verhältnismässig hohen Gehaltes an gröbsten Teilen in obige Gruppe eingereiht.

2. Die Wasserkapazität.

Bei der Wasserkapazität eines Bodens wirken bekanntlich besonders Kapillarität, Porosität und Quellungsvermögen der Bodenteilchen zusammen. Die Zwischenräume zwischen den Bodenpartikeln bilden ein Netz von mehr oder weniger feinen Kapillaren. Im selben Sinne wirkt die Porosität innerhalb der einzelnen Bodenpartikel auch kapillar anziehend und festhaltend und zwar um so mehr, je stärker die Porosität und je kleiner die Bodenzwischenräume. Quellungsvermögen ist eine Eigenschaft, welche Ton und Humus mit anderen quellungsfähigen Stoffen, wie Stärke, Leim etc. teilen.[1])

Im allgemeinen ist die Wasserkapazität um so grösser, je reicher der Boden an Ton, Humus, feinverteilten Eisenverbindungen, Kalk und feinstem Sand, überhaupt je feiner das Korn ist. Die Wasserkapazität auf freiem Felde hängt ausser von obigen Eigenschaften auch von der Lage des Bodens und dem Grundwasserstand, sowie dem Untergrund selbst ab, auch die Mächtigkeit der betreffenden Schicht kommt in Betracht. So stellte z. B. Heinrich[2]) folgendes fest:

Höhe der Bodenschicht von unten	Es wurden von 100 gr Boden zurückgehalten:
90—93 cm	8.6 gr Wasser
75—78 „	11.3 „ „
60—63 „	11.9 „ „
45—48 „	13.6 „ „
30—33 „	15.9 „ „
15—18 „	17.3 „ „
0—3 „	20.3 „ „

Wollny[3]) fand, dass der absolute und volumprozentische Wassergehalt des Bodens um so geringer ist, je grösser der Gehalt desselben an Steinen.

---

[1]) Vergleiche Ramann, Bodenkunde S. 240.

[2]) Heinrich „Über Prüfung der Bodenarten auf Wasserkapazität und Durchlüftbarkeit". Forschungen etc. Bd. 9, S. 261.

[3]) l. c. B. 20, S. 383.

Die von mir angestellten Versuche ergaben:

Bodenart	Nach Methode Wolf			Nach Meth. Wahnschaffe
	Gew. %	Vol. %	Vol. % — Gew. %	Gew. %
Quarzsand	10.21	33.26	23.05	28.5
Kalksand	14.21	34.76	20.55	29.5
humos. Sand	42.90	44.33	1.43	50.0
lehm. Sandboden	20.00	39.41	19.41	49.0
Mergel aus Massenhausen	34.52	49.54	15.02	50.5
Lehm von Freising	25.19	42.11	16.92	40.0
Lehm von Föhring	29.79	44.54	14.75	50.5
Mergel von Erling	25.57	42.32	16.75	39.5
Ton	39.26	53.87	14.61	70.0

Es wäre anzunehmen, dass die Wasserkapazität nach Vol. und Gew. % vom Quarzsand zum Ton gleichmässig steigt; dies ist jedoch nicht der Fall. Der humose Sand hat wegen des hohen Humusgehaltes und der Mergel aus Massenhausen wegen seines grossen Quellungsvermögens eine verhältnismässig grössere Wasserkapazität.

Auch zeigt sich, dass die Differenz zwischen Volum- und Gewichtsprozenten bei jenen Böden, welche nach ihrer Einreihung in das Thaer'sche System eine geringe Wasserkapazität erwarten lassen, jedoch eine hohe haben, sehr gering ist, was sich aus dem spez. und Volumgewicht erklärt.

Die Methode nach Wahnschaffe lässt im allgemeinen dieselben Unterschiede zwischen den verschiedenen Bodenarten finden, diese sind jedoch kleiner, wie bei der Methode nach Wolff. Der lehmige Sandboden zeigt hier eine verhältnismässig hohe Wasserkapazität und zwar aus dem Grunde, weil er sich nach der Methode von

Wahnschaffe untersucht, schwammartig ansaugt, ohne zusammenzuschlämmen.

Die gegen die Bestimmung der Wasserkapazität mit den Wolff'schen Zylindern vielfach erhobenen Vorwürfe, dass die Füllung die Resultate ganz wesentlich beeinflusse, werden dadurch zum Teil entkräftet, dass die durch das bis zu einem gewissen Grade unvermeidliche ungleiche Einfüllen der Erde hervorgerufenen kleinen Fehler, die im Volumgewichte des Versuchsbodens zum Ausdrucke kommen, durch die grössere Wasserkapazität zum Teil ausgeglichen werden. Denn das grössere Hohlraumvolumen hat unter den Versuchsbedingungen eine höhere Wasserkapazität zur Folge und umgekehrt.

So waren z. B. die Resultate dreier Parallelversuche am lehmigen Sandboden folgende:

	Volumgewicht des Bodens:	Wasserkapazität in Volum %	Gew. %
(in Einzelkornstruktur)	1.64	39.19	20.00
	1.63	40.53	20.00
	1.69	38.52	19.29

Daraus ersieht man, dass bei einem und demselben Boden das grössere Volumgewicht die kleinere Wasserkapazität zur Folge hat. Diese Beziehungen werden nur bei jenen Böden verdeckt, deren Konstituenten sich durch grosse Quellungsfähigkeit und Porosität auszeichnen, wie bei den Tonböden und jenen mit viel humoser Substanz.

3. Wasserdurchlässigkeit.

Unter der Filtrationsfähigkeit des Bodens versteht Wahnschaffe[1]) seine Eigenschaft, das Wasser in längerer oder kürzerer Zeit durchsickern zu lassen.

Wollny[2]) sagt, die Permeabilität (Durchlässigkeit) des Bodens für Wasser sei hauptsächlich für die Bewegung des Wassers in jenen Fällen von Wichtigkeit, wo der Boden gesättigt ist und eine weitere Zufuhr von Wasser

[1]) Wahnschaffe, Wissenschaftliche Bodenuntersuchungen. 1903. S. 166.

[2]) Wollny, Forschungen etc. Bd. XIV. S. 1.

zu ihm stattfindet. A. Mayer[1]) versteht hierunter die Filtrationsfähigkeit, namentlich der tieferen Bodenschichten, welche verhindert, dass ein Boden sich über seine Wasserkapazität hinaus mit Wasser sättigt.

Meine Untersuchungen gaben folgendes Resultat:

	Wasserdurchlässigkeit in 10 h:
Quarzsand	14900 cm^3
Kalksand	7400 „
Humoser Sand	460 „
Lehmiger Sandboden	3260 „
Mergel aus Massenhausen	370 „
Lehm von Freising	175 „
Lehm von Föhring	909 „
Mergel von Erling	60 „
Ton	0 „

Die nach dem Thaer'schen System geordneten Böden lassen nicht ohne weiteres die erwartete Reihenfolge erkennen, da es besonders zwei Faktoren sind, welche die Durchlässigkeit beeinflussen. Es ist dies erstens der Humusgehalt, der beim humosen Sand eine auffallend kleine Durchlässigkeit zur Folge hat, und dann der Tongehalt, dessen jeweilige Struktur[2]) von besonderem Einflusse ist, was die beiden Lehme deutlich beweisen.

Die Ursache der geringen Wasserdurchlässigkeit beim sandigen Mergel ist dieselbe, wie die seiner hohen Wasserkapazität, nämlich das grosse Quellungsvermögen.

4. Kohäreszenz und Trennungswiderstand.

Die Kohäreszenz ist von hervorragendem Einfluss auf die grössere oder geringere Leichtigkeit der Bearbeitung des Bodens und auf die Verbreitungsfähigkeit der Wurzeln.

Die genaue Bestimmung der Kohäreszenz ist deshalb von besonderer Wichtigkeit.

[1]) A. Mayer, Agriculturchemie II. Bd. S. 143.

[2]) Die mikroskopische Untersuchung der beiden Lehme ergab, dass die Tonteilchen des Freisinger Lehms mehr kugelige, die des Föhringer Lehms deutliche Blättchenstruktur haben und wesentlich grösser sind.

Hazard[1]) gibt als mittlere Werte der in Gewichtseinheiten ausgedrückten Kohäreszenz folgendes an:

leichter Boden	bis 50 kg
milder Boden	50—100 „
schwach bindiger Boden	100—150 „
mässig bindiger Boden	150—200 „
recht bindiger Boden	200—250 „
schwerer Boden	250 „

Die von mir angestellten Versuche ergaben:

	Kohäreszenz in gr
Quarzsand	187.50
Kalksand	374.37
Humoser Sand	24500.00
Lehmiger Sandboden	69800.00
Mergel aus Massenhausen	33250.00
Lehm von Freising	129220.00
Lehm von Föhring	75100.00
Mergel von Erling	68850.00
Ton	87000.00

Die praktische Beurteilung liess die durch die exakte Bestimmung gefundene Reihenfolge erwarten; eine Ausnahme macht der Ton.

Das starke Zurückbleiben dieses Tons, von dem die grösste Kohäreszenz zu erwarten wäre, erklärt sich daraus, dass sich trotz grosser Vorsicht im Innern der zum Versuche verwendeten Kugeln grosse, das Ergebnis beeinträchtigende Luftblasen bildeten, welche das Resultat der Untersuchung beeinflussten.

Lässt man die Böden gefrieren und bestimmt dann nach derselben Methode die Kohäreszenz, so zeigt sich vor allem, dass dieselbe grösser ist, als die des normalen Bodens. Wollny[2]) stellte fest, dass es besonders der Wassergehalt ist, der einen Einfluss auf die wachsende Festigkeit des gefrorenen Bodens hat. Mergel, Lehm und Ton sprangen bei der Kohäreszenzbestimmung

[1]) Hazard, Beurteilung der wichtigeren phys. Eigenschaften des Bodens. Landw. Versuchs-Stationen Band LX Heft V u. VI.
[2]) Wollny, l. c. Bd. 20, S. 441.

nicht, sondern liessen sich zusammenpressen, wobei sie sich spalteten.

Die Gegenüberstellung der Resultate der Kohäreszenzbestimmung von normalen, gefrorenen und nach dem Frieren wieder aufgetauten und getrockneten Böden ergab folgendes:

Bodenart:	Kohäreszenz des nicht gefrorenen Bodens	Kohäreszenz des gefrorenen Bodens[1])	Kohäreszenz des aufgetauten und ausgetrockneten Bodens
Quarzsand	187.50 gr	Konnte wegen Zerfallens der Kugeln nicht festgestellt werden.	
Kalksand	374.37 „		
Humoser Sand	24500.00 „	181660.00 gr	11330.00 gr
Mergel v. Mshs.	33250.00 „	105000.00 „	13830.00 „
Mergel v. Erling	68850.00 „	80000.00 „	16330.00 „
Lehmiger Sand	69800.00 „	95000.00 „	11500.00 „
Lehm v. Föhring	75100.00 „	130000.00 „	27750.00 „
Ton	87000.00 „	181660.00 „	60830.00 „
Lehm v. Freising	129220.00 „	150000.00 „	55500.00 „

Humoser Sand und Ton haben im gefrorenen Zustand die grösste Festigkeit. — Auch nach Wollny[2]) tritt die Tatsache hervor, dass der nicht gefrorene Boden ein vom gefrorenen abweichendes Verhalten zeigt, was obige Tabelle von neuem beweist. Der Mergel aus Massenhausen zeigt im gefrorenen Zustande eine auffallend hohe Kohäreszenz, welche nach dem Auftauen und Austrocknen sehr stark zurückgeht. Diese Erscheinung ist auf den hohen Gehalt an kohlensaurem Kalk zurückzuführen.

Es lässt sich also auch durch meine Untersuchungen feststellen, dass die Kohäreszenz des gefrorenen Bodens grösser, die des aufgetauten und ausgetrockneten Bodens kleiner ist, als die des normalen Bodens.

[1]) Minim. Temperatur — 3° C., Maxim. Temperatur — 8° C

[2]) Forschungen etc. Bd. 20. S. 443.

Im engsten Zusammenhange mit der oben besprochenen Eigenschaft steht der Trennungswiderstand, das ist jener Widerstand, den ein Boden dem Eindringen eines keilförmigen Körpers entgegensetzt.

Die Resultate meiner Versuche sind folgende:

	Trennungswiderstand bei		
	0 % W. K.	50 % W. K.	100 % W. K.
Quarzsand	256 gr	940 gr	160 gr
Kalksand	950 „	1500 „	240 „
humos. Sand	12000 „	720 „	220 „
lehm. Sandboden	2820 „	1020 „	123 „
Mergel aus Massenhausen	5000 „	1020 „	15 „
Lehm von Freising	25000 „	1740 „	113 „
Lehm von Föhring	3430 „	1205 „	123 „
Mergel von Erling	42000 „	1010 „	142.5 „
Ton	15000 „	1070 „	80 „

Man ersieht deutlich, dass der Einfluss der Feuchtigkeit auf den Trennungswiderstand je nach der Zusammensetzung des Bodens ein verschiedener ist. Während Quarz- und Kalksand bei 50 % Wasserkapazität den grössten Trennungswiderstand leisten, zeigen die anderen der untersuchten Böden diesen in ganz trockenem Zustande.

5. Hygroskopizität und Benetzungswärme.

Unter der Grösse der Hygroskopizität ist diejenige Wassermenge zu verstehen, welche ein Boden enthält, wenn seine Oberfläche gerade mit einer Molekülschicht Wasser benetzt wird. Sie ist also ein Mass für die Bodenoberfläche.

Ich halte mich hiebei an die Definition von Mitscherlich, dass die „Bodenoberfläche" die Summe aller Oberflächen der einzelnen Bodenpartikelchen ist.

Heger[1]) definiert die Hygroskopizität folgendermassen: „Die meisten Erdarten besitzen die Eigenschaft, Wasserdampf aus der Atmosphäre aufzunehmen und an

[1]) Heger, forstliche Bodenkunde und Klimatologie, Erlangen 1856. S. 151.

ihrer Oberfläche zu verdichten. Nach allgemeinen chemischen Gesetzen wird die Absorptionsfähigkeit durch die Grösse der Bodenoberfläche m. a. W. durch den Grad der Zerteilung, in welchem sich die Erdkrume befindet, bedingt."

Die Hygroskopizität hängt also zunächst von der Grösse der Bodenoberfläche ab.

Knop[1]) fand, dass die Hygroskopizität eine Temperaturfunktion sei, insofern der Boden um so weniger Wasser hygroskopisch zu binden vermag, je höher die Temperatur ist.

Rodewald,[2]) der wohl als erster an die wissenschaftlich mathematische[3]) Begründung der Hygroskopizität ging, definiert sie, wie folgt: „Wir wollen das Wort Hygroskopizität im allgemeinsten Sinne gebrauchen und darunter das Verhalten lebloser kolloidaler und nicht kolloidaler, fester und quellbarer Körper, organischer und anorganischer, organisierter und nichtorganisierter Natur verstehen, insoweit, als zwischen Wasser und dem Körper eine Wechselwirkung besteht, die Gleichgewichts- und Bewegungsvorgänge hervorzurufen vermag."

Er sagt ferner, dass das Verhalten des Ackerbodens zu Wasser ein erwünschtes Mittel an die Hand gebe, diejenigen Bodeneigenschaften zu beurteilen, welche man als physikalische zusammenzufassen pflegt.

Die von mir auf Hygroskopizität untersuchten Böden zeigten folgende Werte:

Quarzsand	0.51
Kalksand	1.00
humos. Sand	3.30
sand. Lehmboden	3.80
Mergel von Massenhausen	3.76

[1]) W. Knop, Lehrbuch d. Agrik. Chemie 1868. Bd. II. S. 15.

[2]) Landw. Jahrbücher 1902. Bd. 31. S. 675.

[3]) Nach mathem. Ableitung kommt er zur Formel: Hygroskopizität ist diejenige Wassermenge, für welche in der Benetzungsgleichung log. $(r + i) = C - c\,w$, die Grösse r gleich Null ist (Fühling's landw. Zeitung, Heft 13, 1908.)

Lehm von Freising	5.41
Lehm von Föhring	5.55
Mergel von Erling	3.42
Ton	7.02

Die nach dem Thaer'schen System geordneten Böden zeigen im allgemeinen ein Ansteigen der Hygroskopizität vom Sand zum Ton mit Ausnahme der beiden Mergel, besonders des von Erling.

Die Unterschiede des Lehms von Freising und von Föhring, welche die Kohäreszenzbestimmung und die Wasserdurchlässigkeits-Bestimmung erkennen lassen, kommen im Unterschiede der Hygroskopizität nicht zum Ausdruck. Überhaupt werden die Unterschiede in der Hygroskopizität nicht immer imstande sein, Böden voneinander zu unterscheiden und sie zu klassifizieren, da die Hygroskopizität die Funktion mehrerer Faktoren ist, die verschiedene Variationen zulassen.

Wird ganz trockener Boden mit Wasser benetzt, so erwärmt er sich (Benetzungswärme)[1]). Diese freigewordene Wärme wird demnach abhängen von der Grösse der benetzten Oberfläche und von einer Adhäsionskonstanten. Nach Rodewald[2]) tritt bei der Benetzung noch eine weitere Wärme hinzu, welche dadurch entsteht, dass die Kohäsion einer festen Substanz durch die Wassermoleküle überwunden werden muss. Diese Arbeit ist bei ein und derselben Substanz konstant. Es ergibt sich somit nach Mitscherlich folgende Gleichung für die Benetzungswärme:

$$a\ F = E\ (r + i)$$

wobei E das mechanische Wärmeäquivalent, F die Flächeneinheit, a F die Arbeitsgrösse, welche die Flächeneinheit der festen Substanz zu leisten hat, r die Benetzungswärme, i die Arbeit resp. Wärme, welche durch Überwindung der Kohäsion entsteht, bedeutet.

---

[1]) Mitscherlich, Bodenkunde für Land- und Forstwirte. 1905.

[2]) Rodewald, „Über Quellungs- und Benetzungserscheinungen" Zeitschrift für phys. Chemie XXXIII. 5. S. 593 u. f.

Meine Untersuchungen ergaben folgende Resultate:

	Benetzungwärme (in kal. pro gr.)
Quarzsand	0.025
Kalksand	0.375
humoser Sand	1.655
lehmiger Sandboden	1.720
Mergel aus Massenhausen	1.685
Lehm von Freising	2.495
Lehm von Föhring	2.645
Mergel von Erling	1.675
Ton	10.200

Quarz- und Kalksand haben eine geringe Benetzungswärme, worauf schon Mitscherlich[1]) hinweist. Ton- und Humusgehalt erhöhen sofort die Benetzungswärme. Beim Humus ist der Grad seiner Zersetzung von Einfluss auf seinen kalorischen Wert, indem Humus von höherer Zersetzung mehr Wärme liefert. Ein ähnliches Verhältnis fand Mitscherlich[1]) auch beim Ton, welcher nach seinen Angaben vom reinen Kaolin-Ton zum strengen Ton ein Steigen der Benetzungswärme von 1.79 kal. pro gr bis 15.51 kal. pro gr zeigt.

Der Gang[2]) des Eiskalorimeters schwankte während der Untersuchungen zwischen 0.00753 cm und 0.10120 cm Quecksilbersäule.

Die Korrektion, welche der Luftdruck beim Wassereinströmen nötig macht, wurde nach der von Mitscherlich angegebenen Formel berechnet.

IV. Schlüsse aus den Untersuchungsergebnissen.

I. Da die mechanische Bodenanalyse, deren Ergebnisse mit den physikalischen Bodeneigenschaften in Beziehung zu setzen sind, nach zwei verschiedenen Methoden, nach Kühn und Schöne, ausgeführt ist, so sind zu-

[1]) Mitscherlich, Beurteilung der phys. Eigenschaften des Ackerbodens, etc. Journal für Landw. 1898, S. 264 u. f.

[2]) Derselbe. Bodenkunde. S. 56.

nächst die aus beiden Methoden gewonnenen Resultate miteinander zu vergleichen, so wie es für andere Methoden bereits Puchner[1]) und Pellegrini[2]) angedeutet haben.

Vergleicht man die Menge der nach Methode Kühn bestimmten abschlämmbaren Teile mit den Mengen der Teilchen vom kleinsten hydraulischen Werte nach Methode Schöne, so zeigt sich folgendes:

	Abschlämmbare Teile nach Methode Kühn	hydr. Wert nach Methode Schöne < 0,2 mm G.
Quarzsand	2.77 %	1.00 %
Kalksand	6.23 „	7.80 „
humos. Sand	30.08 „	21.90 „
lehmiger Sandboden	52.70 „	35.25 „
Mergel aus Massenhausen	52.30 „	25.10 „
Lehm von Freising	74.80 „	37.40 „
Lehm von Föhring	73.90 „	42.20 „
Mergel von Erling	81.90 „	41.16 „
Ton	96.10 „	87.02 „

Es sind also die Bestimmungen der abschlämmbaren Teile nach Methode Kühn mit denen des kleinsten hydraulischen Wertes nach Methode Schöne nicht ohne weiteres vergleichbar; die Resultate der ersteren Methode zeigen grössere Zahlenwerte als die der letzteren; es ist jedoch ein gleichmässiges Steigen und Fallen vorhanden.

Addieren wir den hydraulischen Wert < 0.2 mm G. zu dem > 0.2 mm G., < 1.0 mm G. und vergleichen diese Summe mit den Mengen der abschlämmbaren Teile nach Methode von Kühn, so kommen wir zu folgenden Resultaten:

---

[1]) Ein Versuch zum Vergleich der Resultate verschiedener mechanischer Bodenanalysen. Landw. Vers.-Stat. 1902 B. 56, S. 141 u. f.

[2]) Über die physikalisch-chemische Bodenanalyse. Landw. Vers.-Stat. 1880, B. 25, S. 48 u. f.

	Abschlämmbare Teile nach Methode Kühn	hyd. Wert < 0.2 mm + > 0.2 mm, < 1.0 mm n. Meth. Schöne
Quarzsand	2.77 %	3.20 %
Kalksand	6.23 „	14.40 „
humos. Sand	30.08 „	31.50 „
lehmiger Sandboden	52.70 „	51.60 „
Mergel aus Massenhausen	52.30 „	55.10 „
Lehm von Freising	74.80 „	70.85 „
Lehm von Föhring	73.90 „	77.77 „
Mergel von Erling	81.90 „	74.87 „
Ton	96.10 „	90.16 „

Bei Zunahme der abschlämmbaren Teile nach Methode Kühn nimmt auch die Summe der beiden kleinsten hydraulischen Werte nach Methode Schöne zu. Und zwar ist im allgemeinen die Summe der ersten zwei hydraulischen Werte nach Methode Schöne gleich den abschlämmbaren Teilen nach Methode Kühn. Im einzelnen bestehen aber Ausnahmen, wie sehr auffällig beim Kalksand. Als Erklärung dafür mag gelten, dass nach der Methode Kühn Teile nicht mehr abgeschlämmt werden, welche nach Methode Schöne zum hydr. Wert > 0.2 mm, < 1.0 mm gehören, sich jedoch knapp an der Grenze von 0.2 mm Geschwindigkeit bewegen. Immerhin ist interessant, dass die scheinbar ungenaue Kühn'sche Methode doch gute Resultate liefern kann. Damit soll aber nicht gesagt sein, dass die erstere Methode die letztere ersetzen könne, weil es zur genauen Charakterisierung der Böden wichtig ist, die nach Methode Kühn bestimmten abschlämmbaren Teile noch weiter zu zerlegen, wie es mit der Methode Schöne durchgeführt wird. Für manche Zwecke der mechanischen Bodenanalyse kann aber die Methode Kühn ausreichende Aufschlüsse geben.

II. Hinsichtlich der Beziehungen zwischen Grösse der Wasserkapazität zu den Ergebnissen der mechanischen Bodenanalyse stellt schon Wollny[1]) fest, dass erstere unter anderem auch von der Feinheit des Kornes abhängig ist.

[1]) l. c. Bd. 8. S. 189.

Meine Untersuchungen ergaben für den kleinsten hydraulischen Wert nach Schöne und die abschlämmbaren Teile nach Kühn folgendes:

	Apparat Schöne < 0.2 mm G.	abschl. Teile nach Meth. Kühn	Wasserkapazität[1] Gew. %	Vol. %
Quarzsand	1.00 %	2.77 %	10.21 %	33.26 %
Kalksand	7.80 „	6.23 „	14.21 „	34.76 „
humos. Sand	21.90 „	30.08 „	42.90 „	44.33 „
lehm. Sandboden	35.25 „	52.70 „	20.00 „	39.41 „
Mergel aus Massenhausen	25.10 „	52.30 „	34.52 „	49.54 „
Lehm von Freising	37.40 „	74.80 „	25.19 „	42.11 „
Lehm von Föhring	42.20 „	73.90 „	29.79 „	44.54 „
Mergel von Erling	41.16 „	81.90 „	25.57 „	42.32 „
Ton	87.02 „	96.10 „	39.26 „	53.87 „

Die Wasserkapazität nimmt mit den Mengen der feinsten Teilchen zu, aber nicht bei allen Böden. Eine Ausnahme machen der humose Sand und der Mergel aus Massenhausen. Inwieweit die Wasserkapazität ausser von den Grössenverhältnissen der Bodenteilchen durch deren Qualität beeinflusst wird, wäre durch genaue Bestimmungen des Gehaltes an Ton, Quarz, Eisenoxyd, Humus etc. zu ermitteln. Hierüber geben die von Wollny[2] angestellten Versuche (mit Ton-Humus-Sandgemengen etc.) mit Aufschluss. Auch scheint es, dass der verschiedene Gehalt an kolloidalen Bestandteilen und der Unterschied in der Form der feinsten Teilchen von bedeutendem Einflusse ist. Alle Böden, die eine schleimig-seifige Beschaffenheit haben, — vermutlich infolge eines grösseren Gehaltes an Kolloidsubstanzen[3] — zeigen eine verhältnismässig hohe Wasserkapazität. Beim humosen Sand ist es der Humusgehalt, beim Mergel aus Massenhausen die schleimig-seifige Beschaffenheit, welche als Ursache der Abweichung angesehen werden können. Die Ursache der geringeren Wasserkapazität des Quarzsandes gegenüber dem Kalksand[4] mag darin begründet sein, dass die

[1] Boden in Einzelkornkonstruktur, um einen einheitlichen Zustand herzustellen.

[2] l. c. B. 18. S. 11.

[3] l. c. B. 20. S. 175.

[4] Vergleiche Wollny, Untersuchungen über die Wasserkapazität der Bodenarten. l. c. B. 9. S. 363.

kleinsten Kalkteilchen infolge ihrer sehr unregelmässigen Gestalt eine stärkere Attraktion auf das Wasser auszuüben vermögen, als die glatteren Quarzkörner.

Die nämlichen Faktoren beeinflussen auch die Wasserdurchlässigkeit in hohem Masse. So fand Wolff[1]) bei sechs Bodenproben einen annähernd umgekehrten Parallelismus zwischen Tongehalt und Durchlässigkeit[2]) und zwar:

Bodenart	Tongehalt des Bodens in %	Humusgehalt des Bodens in %	Zahl der Stunden, innerhalb welcher der Durchtritt des Wassers erfolgt
1. Sehr feinkörniger sand., lehmiger Bod.	15.74 (100)	0.88	20.3 (100)
2. dto.	15.96 (100)	1.40	25.8 (127)
3. Schwarzer, humoser, kalkiger Lehmsandboden	18.17 (115)	6.87	31.0 (152)
4. Sehr feinkörniger sand. lehm. Boden	25.93 (164)	0.92	75.8 (373)
5. Sehr toniger Boden	42.56 (270)	0.66	133.0 (655)
6. Boden mit ziemlich viel tonig. Substanz.	29.76 (189)	2.19	188.0 (926)

Zu ähnlichen Resultaten gelangte Flügge[3])

	Filtratmenge pro Minute in cm³
Reiner grober Kies	sehr viel
feinkörniger Sand I	103.0
dto. II	87.3
feinster Sand	25.7
3 Teile Sand I, 1 Teil Lehm	15.5
1 Teil Kies, 2 Teile Sand I, 1 Teil Lehm	7.4
1 Teil Sand I, 1 Teil Lehm	2.1
Reiner Ton	0

[1]) Anleitung zur Untersuchung landwirtschaftlich wichtiger Stoffe. 1875. S. 74.

[2]) Wolff bestimmt diese, indem er eine Erdsäule von 16 cm in einen Zinkkasten von 16 cm Höhe einfüllte, mit Wasser sättigte und sodann durch einen Ansatz eine Wassermenge von 8 cm Höhe aufgoss, deren Durchsickern der Zeit nach er beobachtete.

[3]) Zeitschrift für Biologie B. 13. 1877, S. 465.

Beide zitiert v. Wollny in Forschungen etc. B. 14. S. 1 und 2.

Aus diesen Zahlen lässt sich zur Genüge entnehmen, dass die Filtrationsfähigkeit des Bodens für Wasser um so kleiner ist, je grösser sein Gehalt an feinkörnigen Bestandteilen, ferner dass der Ton für Wasser undurchdringbar sei. Die von mir angestellten Untersuchungen bestätigen im allgemeinen die Richtigkeit obiger Folgerung:

	Wasserdurchlässigkeit (cm 3 in 10 Stunden)	Abschl. Teile nach Meth. Kühn	hydr. Wert n. Meth. Schöne < 0.2 mm G+ > 0.2 mm < 1.0 mm
Ton	0	96 10 %	90.16 %
Mergel v. Erling	60	82.00 „	74.87 „
Lehm v. Freising	175	74.80 „	70.85 „
Lehm v. Föhring	909	73.90 „	77.77 „
lehm. Sandboden	3260	52.70 „	51.60 „
Kalksand	7400	6.23 „	14 40 „
Quarzsand	14900	2.77 „	3.20 „
Mergel aus Massenhausen	370	52.30 %	55.10 %
humoser Sand	460	30.08 „	31.50 „

Es zeigt sich, dass die Wasserdurchlässigkeit bei steigendem Gehalt an abschlämmbaren Teilen fällt.

Eine feste Beziehung lässt sich jedoch nicht aufstellen, weil die feinsten Teilchen aus verschiedenen Konstituenten bestehen, die von ungleichem Einflusse sind. So schlägt der humose Sand aus, weil er sich schwammartig ansaugt und die Kapillarkraft grösser ist, als der hydrostatische Druck, von welcher Erscheinung noch später die Rede sein wird.

Auch der sandige Mergel macht eine Ausnahme, weil er sich aufschlämmt und schleimig wird. Eine Bestätigung dieser Tatsache ist der auffallend niedrige Trennungswiderstand (15 gr) bei 100 % Wasserkapazität.

Seelheim[1]) formuliert die Schlussergebnisse seiner Arbeit in folgender Weise:

[1]) Archives Néerlandaises des sciences exactes et naturelles. Tome 14. p. 39. (Besprochen in Forschungen etc. B. 3. S. 242.)

„Die Gesetze der Durchlässigkeit des Sandes, des Tones und des Kalkes können wie folgt bezeichnet werden: Unter sonst gleichen Bedingungen ist die Durchlässigkeit für jede dieser Substanzen proportional:

1. Der Summe der tranversalen Querschnitte der Zwischenräume, durch die das Wasser dringen kann.

2. Dem transversalen Querschnitte dieser Poren oder kapillaren Zwischenräume einzeln genommen.

Die Definition schliesst die Existenz einer besonderen Konstante für jede Materie in sich. Der Umstand, dass die Durchlässigkeit proportional dem horizontalen Querschnitte der Poren isoliert genommen ist, erklärt sich durch die Wirkung der Schwere in Verbindung mit der Kohäsion."

Welitschkowsky[1]) beschäftigte sich in seinen Untersuchungen vornehmlich mit der Frage nach der Abhängigkeit der den Boden durchströmenden Wassermengen einerseits vom Druck, anderseits von der Schichthöhe des Materials. Die erhaltenen Resultate zeigen ganz gesetzmässige Beziehungen zwischen den durch den Boden gegangenen Wassermengen und dem Druck, sowie der Schichthöhe.

Auf Grund einer Reihe von Versuchen Welitschkowskys kommt Wollny u. a. zu den Resultaten, dass die Bodenkonstituenten, wenn sie bestimmte Korngrössen nicht überschreiten, für Wasser fast ganz undurchdringbar sind, ferner, dass die Filtrationsfähigkeit des Gemisches verschiedener Kornsortimente sich der kleinsten Korngrösse (im Versuch des feinsten Sandes) nähert.

Hiezu ist jedoch zu bemerken, dass Wollny Siebprodukte und keine hydraulischen Werte benützte. Ferner ist nach Wollny die chemische Zusammensetzung des feinsten Materials für die Durchlässigkeit gleichgültig.

Als Ursache der Wasserundurchlässigkeit einzelner Böden, besonders von Ton und Humusböden, wird auch das Quellungsvermögen angegeben. So fand z. B.

---

[1]) Archiv f. Hygiene B. 2. 1884 (zitiert v. Wollny l. c. B. 10. S. 203).

A. R. v. Schwarz,[1]) dass ein Moorboden 2½-, ein Ton eine 1½fache Volumvermehrung durch Imbibition erfuhr. Bei diesen Böden bildet sich infolgedessen eine plastische Masse, welche die eingeschlossenen Wasserteilchen mit grosser Energie festhält.

III. Auch die Kohäreszenz des Bodens steht mit seinem Gehalt an feinsten Teilchen in engem Zusammenhange. So fand Haberlandt,[2]) dass man im allgemeinen sagen kann, dass mit zunehmendem Gehalte an feinsten Teilchen sich auch die Kohärenszenz des Bodens steigere, indessen seien auch Abweichungen der Ergebnisse der mechanischen Analyse und der Festigkeitsprüfung nicht ausgeschlossen, bedingt durch die chemische Natur der Bodengemengteile, ihre Form und Oberflächengestalt.

Schübler[3]) fand, dass besonders Humus und Sand die Kohäreszenz des Bodens beeinflussen. Da sich jedoch nicht feststellen lässt, was Schübler unter Sand versteht, so konnte dies nicht nachuntersucht werden, es wurde jedoch eine Übereinstimmung zwischen der Kohäreszenz und den Teilchen < 0.2 mm G. (Schöne) gefunden:

	Kohäreszenz in gr	hydr. Wert < 0.2 mm G.
Quarzsand	187.50	1.00 %
Kalksand	374.37	7.80 „
humos. Sand	24500.00	21.90 „
Mergel aus Massenhausen	33250.00	25.10 „
Mergel von Erling	68850.00	41.16 „
lehmig. Sandboden	69800 00	35.25 „
Lehm von Föhring	75100.00	42.20 „
Ton	87000.00	87.02 „
Lehm von Freising	129220.00	37.40 „

Der Mergel aus Erling zeigt eine Ausnahme, da der grosse Gehalt an kohlensaurem Kalk (69.32 %) in der

[1]) Vergleichende Versuche über die phys. Eigenschaften verschiedener Bodenarten, Wien 1878. S. 51 u. f. (Besprochen in Forschungen etc. Bd. II. S. 164 u. f.)

[2]) Forschungen etc. Bd. XII. S. 202—3.

[3]) Agrikulturchemie II S. 77. Leipzig 1838.

Form, wie er speziell bei Mergeln vorkommt, mit eine Ursache für die niedrige Kohäreszenz ist.

Die Ursache der scheinbar geringen Kohäreszenz des Tons liegt in den Mängeln der Versuchsanstellung. Trotz grosser Sorgfalt gelang es nicht, homogene Kugeln zu verfertigen; im Innern zeigten sich immer Luftblasen.

Im Gegensatz zu Haberlandt führt Hazard[1]) an, dass die Schlämmanalyse über die Bindigkeit in keinem Falle Auskunft zu erteilen vermöge, am allerwenigsten bei Lehmen, zumal den Lössgebilden, und dass die chemische Analyse des Tons andrerseits eine sehr zeitraubende Operation sei. In letzterem Falle genügt aber nach meiner Meinung die mikroskopische Untersuchung des Tons, um so mehr, als die chemische Tonanalyse ungenau ist.[2])

Auch Bagger[3]) stellt als Ergebnis seiner Arbeit u. a. auf, dass die abschlämmbaren Teile allein und besonders die Hygroskopizität keinen brauchbaren Schluss auf die Bindigkeit gestatten. Ähnlich wie Haberlandt führt Puchner[4]) bezüglich des Trennungswiderstandes aus, dass dieser um so grösser sei, je feiner die Bodenteilchen sind und umgekehrt. Nach meinen Untersuchungen lässt sich eine Regelmässigkeit im Sinne obigen Satzes im allgemeinen nicht feststellen:

	hydr. Wert < 0.2 mm G.	Trennungswiderstand bei 0% W.K.	50%	100%
Quarzsand	1.00	255	940	160
Kalksand	7.80	950	1500	240
humos. Sand	21.90	12000	720	220

[1]) Beurteilung der wichtigeren phys. Eigenschaften des Bodens auf Grund der mech. Bodenanalyse. Landw. Vers.-Stat. Bd. 60. S. 170.

[2]) Vergl. auch Lafer u. Wahnschaffe, Unters. des Bodens der Umgeb. v. Berlin. 1881. S. 40 u. f.

[3]) Einige Versuche über die Bindigkeit des Bodens etc. Nach Jahresbericht der Landwirtschaft 1907 aus „Der Kulturtechniker" 1907 Nr. 1. S. 64.

[4]) Untersuchungen über die Kohäreszenz der Bodenarten. Forschungen etc. Bd. 12. S. 213 u. f.

	hydr. Wert < 0.2 mm G.	Trennungswiderstand bei 0 % W.K.	50 %	100 %
Mergel aus Massenhausen	25.10	5000	1020	15
lehm. Sandboden	35.25	2820	1020	123
Lehm von Freising	37.40	25000	1740	113
Mergel von Erling	41.16	42000	1010	142
Lehm von Föhring	42.20	3430	1205	123
Ton	87.02	15000	1070	80

Ferner sagt Puchner, dass der in Rede stehende Widerstand bei sandigen Böden bei einem mittleren Feuchtigkeitsgehalt derselben am höchsten ist und bei höherem oder niedrigerem Wassergehalt stetig abnimmt. Dieser Satz scheint nur da Gültigkeit zu haben, wo der Sand keine reichlicheren Beimengungen anderer Bestandteile, wie Ton oder Humus, hat; andernfalls trifft diese Regel nicht mehr zu:

	Trennungswiderstand bei 0 % W.K.	50 % W.K.	100 % W.K.
Quarzsand	256	940	160
Kalksand	950	1500	240
humos. Sand	12000	720	220
lehmig. Sandboden	2820	1020	280

IV. Die Schlämmanalyse nach Schöne trennt nach Korngrössen. Im allgemeinen ist anzunehmen, dass die Summe der Oberflächen der Teilchen eines Bodens um so grösser ist, je kleiner diese Teilchen sind. Da nun die Hygroskopizität eine Funktion der Oberfläche ist, so ist anzunehmen, dass die kleinsten hydraulischen Werte und die Hygroskopizität in gewissem Zusammenhange stehen:

	Hygroskopizität	hydr. Wert < 0.2 mm G.
Quarzsand	0,51	1.00 %
Kalksand	1.00	7.80 „
humos. Sand	3.30	21.90 „
Mergel von Erling	3.42	41.16 „

	Hygroskopizität	hydr. Wert < 0.2 mm G.
Mergel aus Massenhausen	3.76	25.10 „
lehmiger Sand	3.80	35.25 „
Lehm von Freising	5.41	37.40 „
Lehm von Föhring	5.55	42.20 „
Ton	7.02	87.02 „

Die Hygroskopizität nimmt also mit dem kleinsten hydraulischen Werte in gleichem Masse zu. Wenn der Mergel aus Erling hier eine Ausnahme macht, so ist dies deshalb, weil hier infolge des feinen Mineralstaubes, der sich in obigem hydraulischem Werte befindet, nur eine geringe Hygroskopizität entsteht. Es folgt also aus der Tabelle, dass die Hygroskopizität tatsächlich in gewissem Sinne ein Maas für die Feinheit des Bodens ist.

Albert[1]) stellt fest, dass die praktische Zuverlässigkeit dieser Methode noch verschiedener Nachprüfungen bedürfe, da die Versuche von König[2]) ihre Verwendbarkeit nicht beweisen und auch die Ehrenberg'sche[3]) Abhandlung darauf hinweist, dass durch das scharfe Trocknen der Böden Eigenschaften, die die Hygroskopizität derselben besonders beeinflussen, verändert werden.

Albert[4]) selbst weiss für die bei der Untersuchung seiner Böden gefundenen hygroskopischen Werte keine Verwendung.

Mitscherlich[5]) berechnet, dass die Benetzungswärme nicht proportional der Hygroskopizität sein könne, gibt jedoch zu, dass beide Grössen einander ähnlich seien, und sagt ferner, dass die Frage, ob nicht die Hygroskopizität sich besser zur Bodenuntersuchung eigne, als die Benetzungswärme, dahin zu beantworten

[1]) Biologisch-chemische Studien in Waldböden. Journal für Landwirtschaft 1908. B. 56, Heft 4.

[2]) Landw. Vers.-Stationen. B. 66, S. 401 u. f.

[3]) Mitteilungen der landw. Institute der K. Universität Breslau 1908. B. 4. Heft 3. S. 445 u. f.

[4]) l. c. S. 369.

[5]) Beurteilung der phys. Eigenschaften des Ackerbodens mit Hilfe seiner Benetzungswärme. Journal für Landwirtschaft 1898 S. 263.

sei, dass die Beobachtungen der Hygroskopizität leicht durch Kondensationsvorgänge getrübt werden können.

Da jedoch ein Zusammenhang zwischen Benetzungswärme und Oberfläche besteht, so muss dieser Zusammenhang auch zwischen Benetzungswärme und Hygroskopizität vorhanden sein.

Dem entsprachen auch die durchgeführten Versuche:

	Hygroskopizität	kalorischer Wert
Quarzsand	0.51	0.025kal. pro gr.
Kalksand	1.00	0.375 „ „ „
humos. Sand	3.30	1.655 „ „ „
lehmiger Sandboden	3.80	1.720 „ „ „
Mergel aus Massenhausen	3.76	1.685 „ „ „
Lehm von Freising	5.41	2.495 „ „ „
Lehm von Föhring	5.55	2.645 „ „ „
Mergel von Erling	3.42	1 675 „ „ „
Ton	7.02	10.200 „ „ „

Die untersuchten Böden zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Hygroskopizität und Benetzungswärme, was auch eine Korrelation zwischen letzterer und den kleinsten hydraulischen Werten bedingt:

	kalorischer Wert	hydr. Wert < 0.2 mm G.
Quarzsand	0.025	1.00
Kalksand	0.375	7.80
humos. Sand	1.655	21.90
Mergel von Erling	1.675	41.16
Mergel aus Massenhausen	1.685	25.10
lehmiger Sandboden	1.720	35.25
Lehm von Freising	2.495	37.40
Lehm von Föhring	2.645	42.20
Ton	10.200	87.02

Es besteht hier ein ähnliches Verhältnis, wie zwischen der Hygroskopizität und dem Wert < 0.2 mm G. nach Methode Schöne, also lässt sich auch zwischen allen Bodeneigenschaften, die in einem Verhältnis zum kleinsten hydraulischen Werte stehen, und der Hygroskopizität, sowie den kalorischen Werten eine Korrelation feststellen.

Da Beziehungen zwischen dem hydraulischen Wert < 0.2 mm G. und Wasserkapazität, Wasserdurchlässigkeit und Kohäreszenz festgestellt werden konnten, so war aus den Grössen der Hygroskopizität sonach ohne weiteres auf die Abstufungen dieser Eigenschaften zu schliessen.

Dies Verhältnis ist in dieser Arbeit aber nur für Böden nachgewiesen, die im Thaer'schen System weit voneinander stehen. Inwieweit es auch für naheverwandte Böden Gültigkeit hat, ist erst noch gesondert zu ermitteln.

Aus vorliegender Arbeit geht hervor, dass bei den von mir untersuchten Böden in Beziehung stehen:

1) Die Menge der abschlämmbaren Teile nach Methode Kühn zu dem hydr. Werte < 0.2 mm G. und > 0.2 mm G. < 0.1 mm G. nach Methode Schöne;
2) die Wasserkapazität zu obigen hydr. Werten;
3) die Wasserkapazität zur Wasserdurchlässigkeit;
4) die Wasserdurchlässigkeit zu dem Gehalt an abschlämmbaren Teilen nach Methode Kühn und den hydr. Werten < 0.2 mm G. und > 0.2 mm G. < 1.0 mm G. nach Methode Schöne;
5) die Kohäreszenz zu obigem kleinsten hydr. Werte und zu dessen Summe mit > 0.2 mm G., < 1.0 mm G. und zu den Mengen der abschlämmbaren Teile nach Kühn;
6) die Kohäreszenz zu den kalorischen Werten;
7) die Kohäreszenz zur Hygroskopizität;
8) die Hygroskopizität zu den kalorischen Werten;
9) die Hygroskopizität zu dem kleinsten hydr. Werte nach Methode Schöne und zu dessen Summe mit > 0.2 mm G., < 1.0 mm G., ferner zu den abschlämmbaren Teilen nach Methode Kühn;

10) die kalorischen Werte zu den hydr. Werten < 0.2 mm G; < 0.2 mm G, $+ > 0.2$ mm G. < 1.0 mm G.;
ferner zu dem Gehalte an abschlämmbaren Teilen nach Kühn.

Wenn, was vorkommen kann, obige Korrelationen bei einzelnen Böden in dem einen oder anderen Punkte nicht zutreffen, so liegt die Ursache oft darin, dass ein Faktor, wie z. B. hoher Kalkgehalt, den Einfluss der anderen Eigenschaften aufzuheben vermag. Dieser ist jedoch unschwer festzustellen und seiner Wirkung nach bekannt.

Bei einiger Übung und Erfahrung kann leicht nach Feststellung eines solchen Faktors in befriedigender Weise auf den Grad der durch ihn hervorgerufenen Abweichung geschlossen werden.

Obige Sätze dürfen, da sie an einer verhältnismässig geringen Anzahl von Bodenarten festgestellt wurden, vorerst nicht mehr, als oben geschehen, verallgemeinert werden.

Die fortzusetzenden Arbeiten werden sich auf umfangreicheres Material und besonders auch auf eng verwandte Bodengruppen zu erstrecken haben, um den Grad der Unterschiede innerhalb dieser Gruppen zu ermitteln.

Werden diese Zahlen einmal zur Verfügung stehen, so wird eine weitgehende Verwendung der mechanischen Bodenanalyse und der Werte der Bestimmungen einzelner physikalischer Bodeneigenschaften ermöglicht und damit ein wichtiger Anhalt bei der Bodenbonitierung gewonnen sein. Dies wird um so mehr zutreffen, wenn Methoden geschaffen sein werden, welche gestatten, die Resultate der Versuche im Laboratorium und auf dem freien Felde miteinander zu vergleichen.

Bei dem enormen Umfange der zur Erreichung obigen Zieles anzustellenden Untersuchungen musste sich die vorliegende Arbeit damit begnügen, einen begrenzten Beitrag hiezu zu liefern, der aber geeignet sein möchte, sich anschliessenden Untersuchungen eine vielleicht nicht belanglose Unterlage zu geben.